干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

近50 a新疆风蚀气候侵蚀力迁移特征及影响因素研究

王雅琴[1,2]， 杨海梅[1,2]， 范文波[1,2]， 许忠宇[3]， 乔长录[1,2]

（1. 石河子大学水利建筑工程学院，新疆 石河子 832000；2. 石河子大学现代节水灌溉兵团重点实验室，新疆 石河子 832000；3. 石河子大学理学院，新疆 石河子 832000）

摘 要：以1969—2019年新疆维吾尔自治区62个气象站点的逐日气象资料为数据基础，探究气象因子变化对风蚀气候侵蚀力的影响；运用地理加权回归模型及重心迁移模型，从时空尺度上分析新疆风蚀气候侵蚀力重心迁移规律；结合有效敏感性指数和有效影响面积（EIA）等指标，定量描述风蚀气候侵蚀力对各气象因子的敏感程度，从区域尺度上分析新疆不同区域影响风蚀气候侵蚀力的主导因子差异性。结果表明：近50 a风蚀气候侵蚀力的重心迁移范围主要分布在南疆、北疆和东疆交界处，年际与月际迁移方向均呈现西北—东南—西北的往复迁移特征，春夏季来临之际重心由西北向东南方向迁移，寒冷季节临近时则向西北回迁。气候因子对风蚀气候侵蚀力的影响程度表现为风速>气温>降水量>相对湿度。近30 a来风速、平均气温、相对湿度及降水量对风蚀气候侵蚀力的EIA分别减少了124598.15 km^2、51891.28 km^2、11287.12 km^2、18627.12 km^2。区域上，北疆阿勒泰地区风蚀气候侵蚀力主要受相对湿度及降水量的影响，南疆西南部地区风蚀气候侵蚀力主要受风速和平均气温的影响，东疆地区风蚀气候侵蚀力主要受风速的影响。研究结果可为新疆地区土壤风蚀灾害的防治及评估提供区域性的差异化理论指导，同时为土壤风蚀的大尺度驱动力研究提供新的研究视角。

关 键 词：风蚀气候侵蚀力；气候变化；重心迁移；地理加权回归；新疆

文章编号：

近年来，国际社会对气候变化背景下的土壤侵蚀给予了高度重视[1-2]，IPCC历次评估报告中也直接或间接涉及了气候变化对荒漠化影响等方面的内容[3]。而土壤风蚀作为我国干旱半干旱地区风沙活动和土地沙漠化的首要环节，既是气候变化的响应者，同时也对生态系统产生反馈作用，是生态评价的重要指标[4]，新疆作为我国西北典型的干旱区，干旱少雨的气候条件和脆弱的生态环境，使其对气候变化的响应十分敏感[5]，此外，土壤风蚀是该区面临的主要环境问题，在此背景下，新疆地区的土壤风蚀如何响应区域气候变化则是一个需要深入探讨研究的科学问题。

目前，国际上采用风蚀气候侵蚀力（C值）来度量气候影响土壤风蚀的可能程度[6]，其计算模型和方法经过多次修订后被广泛应用于各地风蚀气候侵蚀力的评估及其对区域气候变化的响应研究。Zhao等[7]通过研究气候变化对非洲南部地区土壤风蚀的影响发现风速、平均气温和降水量对该地区的土壤风蚀影响程度分别为39.89%、18.96%和24.63%；Yang等[8]通过研究我国北方气候侵蚀力对气候变化的敏感性发现风速变化1%会导致C值变化超过3%，降水量和相对湿度对C值的影响较风速次之，C值对平均气温变化不敏感。吴成永等[9]对青海省风蚀气候侵蚀力的驱动力分析发现柴达木盆地C值主要受降水影响，东昆仑山及江河源区西部地区C值主要受风速和平均气温的影响；韩柳[10]评估了风速对我国北方地区风蚀气候侵蚀力的影响发现平均风速的降低是导致我国北方风蚀区风蚀气

收稿日期：2021-05-17； **修订日期**：2021-07-08

基金项目：国家自然科学基金项目（51569028）；国家自然科学基金项目（51769030）；国家自然科学基金项目（41761064）资助

作者简介：王雅琴（1997-），女，硕士研究生，主要从事区域土壤风蚀研究. E-mail: 1565266581@qq.com

通讯作者：范文波（1975-），男，教授，主要从事水土保持及农业水土环境相关研究. E-mail: fwb205@163.com

候侵蚀力减小的直接因素；杨兴华、马茜茜等[11-12]对塔里木盆地和阿拉善高原风蚀气候侵蚀力的研究均指出C值主要受到风速的制约，降水的增加对C值的减弱作用甚微。祁栋林等[13]对青海省冬春季风蚀气候侵蚀力的研究指出东部农业区和环青海湖区C值主要受制于风速和降水量，三江源区C值则受风速、平均气温和降水量的共同作用。上述已有研究定性分析了不同区域风蚀气候侵蚀力的气候驱动力，但仅通过探究各要素的正负效应无法进行定量分析，还不足以揭示风蚀对气候变化的响应机理，因此本文基于重心迁移模型来分析风蚀气候侵蚀力年/月重心迁移规律，运用地理加权回归模型探究各气象因子对风蚀气候侵蚀力影响的空间非稳定性特征，并结合有效敏感指数及有效影响面积(EIA)来定量描述各解释变量对风蚀气候侵蚀力影响的强弱程度。研究结果以期更进一步揭示土壤风蚀对气侯变化的综合响应机理，为新疆地区环境保护及生态安全建设提供一定的背景支持。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

新疆占地面积1.66×10^6 km²，属典型大陆性干旱气候，干燥少雨，风力强劲，四季气温相差悬殊；境内地形地貌条件复杂，形成了山体、绿洲、盆地交替的地貌格局。受特有的地貌特征与大气环流的影响，大风日数和降水量的分布均形成了北疆多于南疆的格局；独特的地形特征使其生态类型复杂多样，干旱少雨加之境内风区广布使其区域生态环境脆弱，土壤风蚀、沙化等问题突出[14]，风蚀荒漠化土地广布于新疆两大盆地及周边平原地带，风蚀荒漠化占全疆荒漠化面积的75.86%[15]。

1.2 数据来源与处理

本研究选用的气象资料来源于国家气象科学数据共享服务平台(http://data.cma.cn/)提供的“中国地面气候资料日值数据集(V3.0)”剔除塔中站及乌鲁木齐牧试站等数据严重不连续台站，使用临近日平均值来代替补全单个值缺失数据，最终选定1969—2019年62个气象站点的气温、降水量、相对湿度、风速等指标作为计算初始值。DEM数据来自中科院寒区旱区科学数据中心(http://data.casnw.net/portal)分辨率90 m。

1.3 研究方法

1.3.1 ***风蚀气候侵蚀力*** 本文利用联合国粮农组织(FAO)订正的计算公式[16]计算风蚀气候侵蚀力(C值)；月潜在蒸发量(ETP_i)采用《生态保护红线划定指南》(环办生态[2017]48号)文件中提供的方法计算[17]；采用幂值指数法将风速数据修正到2 m高度处：

$$C=\frac{1}{100}\sum_{i=1}^{12}\overline{u}_i^{\,3}\left(\frac{ETP_i-p_i}{ETP_i}\right)d \tag{1}$$

$$ETP_i=0.19(20+T_i)^2(1-r_i) \tag{2}$$

$$u_2=u_1\left(z_2/z_1\right)^{1/7} \tag{3}$$

式中：C为风蚀气候侵蚀力；$\overline{u}_i$为2 m高处的平均风速(m·s⁻¹)；ETP_i为月潜在蒸发量(mm)；p_i为月降水量(mm)；d为月天数(d)；T_i为月平均气温(℃)；r_i为月平均相对湿度(%)；u_1和u_2分别为高度z_1和z_2处的风速，风速切变指数为1/7[18]。

1.3.2 ***重心迁移模型*** 重心是引用人口地理学中常见的人口分布重心原理求得的，参考文献[19]给出重心计算公式：

$$X=\frac{\sum_{i=1}^{n}C_ix_i}{\sum_{i=1}^{n}C_i},\quad Y=\frac{\sum_{i=1}^{n}C_iy_i}{\sum_{i=1}^{n}C_i} \tag{4}$$

$$\theta=\theta_\alpha-\theta_\beta=\frac{n\pi}{2}+\arctan\left(\frac{Y_\alpha-Y_\beta}{X_\alpha-X_\beta}\right) \tag{5}$$

$$d=d_\alpha-d_\beta=k\times\sqrt{\left(X_\alpha-X_\beta\right)^2+\left(Y_\alpha-Y_\beta\right)^2} \tag{6}$$

式中：X和Y为风蚀气候侵蚀力的重心地理坐标[20]；n为研究区域气象站点的个数；C_i为该区第i个气象站点的风蚀气候侵蚀指数值；(x_i,y_i)为第i个气象站点的地理坐标；θ为第α年相对于第β年重心移动的角度($-180°\leqslant\theta\leqslant180°$)；$(X_\alpha,Y_\alpha)$和$(X_\beta,Y_\beta)$分别为第$\alpha$年和第$\beta$年风蚀气候侵蚀力的重心地理坐标；$d$为第$\alpha$年相对于第$\beta$年重心移动的距离；$k$为常数，其值为111.111，逆时针方向为正。

1.3.3 ***地理加权回归模型*(GWR)** 地理加权回归模型[21]考虑了自变量的空间分异特征，是对全局回归模型的进一步扩展，具体计算方法为：

$$y_i=\beta_0(u_i,v_i)+\sum_{j=1}^{k}\beta_j(u_i,v_i)x_{ij}+\varepsilon_i \tag{7}$$

式中：y_i为第i个样本点的因变量；β_0为常数项；(u_i,v_i)为第i个样本点的坐标；$\beta_j(u_i,v_i)$为第i个样本点第j

个回归参数；x_{ij}为第i个区域第j个自变量的值；ε_i是服从均值为零的独立正态分布的误差。

本文选择C值作为因变量，气象因子作为解释变量，并采用0.3°×0.3°的格网对数据进行重采样，划分为2104个格网。运用正态QQ图法检验[22]及最小二乘法模型（OLS）[23]分别检验解释变量的正态性及共线性，最终选定气温、降水量、风速、相对湿度为满足地理加权回归的解释变量。

1.3.4 解释变量的有效影响面积 GWR回归系数的大小反映各解释变量对风蚀气候侵蚀力的影响程度。本文将每个格网点解释变量的回归系数通过自然断裂法分为5级，取绝对值最大一级的回归系数作为有效敏感性指数（ESI）[9]，来反映解释变量对风蚀气候侵蚀力的敏感程度，并根据解释变量的有效敏感指数定义EIA来定量地描述气象因子影响风蚀气候侵蚀力的程度。

$$\mathrm{EIA}=\sum A_i\left(\frac{|\mathrm{ESI}_i|}{\sum_i^n|\mathrm{ESI}_i|}\right),\ (i=1,2,3,\cdots,n) \quad (8)$$

式中：EIA为有效影响面积；A_i为第i个解释变量格网面积；ESI_i为第i个解释变量有效敏感性指数；n为解释变量个数。

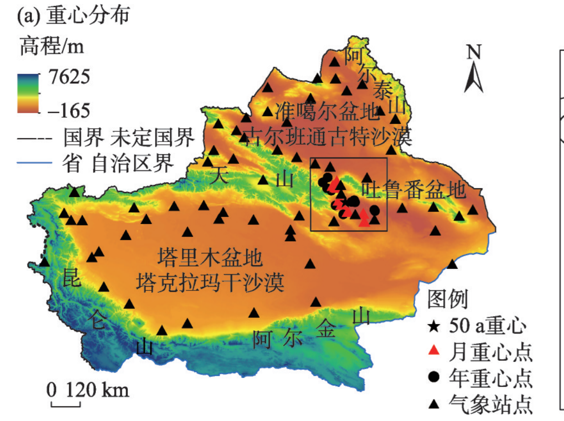
2 结果与分析

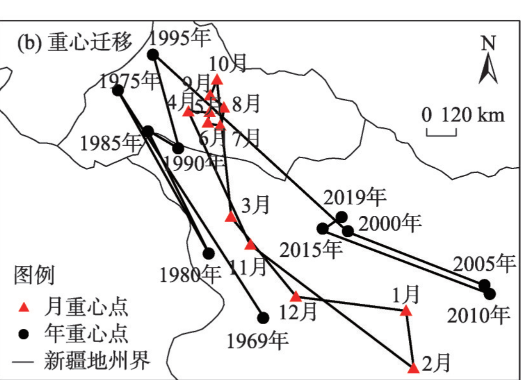
2.1 风蚀气候侵蚀力的重心迁移特征

风蚀气候侵蚀力的重心迁移特征（以迁移距离及迁移角度来表征）见图1。

据图1b和表1，50 a间风蚀气候侵蚀力的重心主要集中于南北东三疆交界处，主要在42°27′28″~43°42′50″N，87°08′59″~90°05′24″E区域内移动，其中向西北方向平均移动4次，向东南方向移动8次，表明多年来风蚀气候侵蚀力的重心主要向东南方向移动。从具体的移动轨迹来看，重心的迁移主要经历了3个阶段，1969—1995年，风蚀气候侵蚀力重心向西北方向移动了191.34 km，平均移动速率为7.36 km·a^{-1}；1995—2010年，风蚀气候侵蚀力重心以21.69 km·a^{-1}的速度大幅度向东南方向移动325.33 km；在2010年后重心出现向西北回迁的趋势但整体向东南移动了191.15 km。从3个阶段来看，新疆风蚀气候侵蚀力在50 a间整体呈现西北—东南—西北的迁移规律，但其向西北方向移动的距离近似于向东南方向移动距离，最终倾向于向高纬度地区移动。

据图1b和表2，风蚀气候侵蚀力月重心在1—4月大幅向北移动，累计向西北方向移动了309.51 km；4—10月重心变化幅度减小且位置变化范围相对集中，10月—次年2月风蚀气候侵蚀力重心以81.96 km·月$^{-1}$的速度大幅度向东南方向移动，可以看出，在春夏季节来临之际新疆风蚀气候侵蚀力重心会由南向北，由西向东迁移，寒冷季节临近时重心则迁回天山西南部地区，出现这种趋势的主要原因与南北疆的气候条件有关，月重心发生大幅度变化的月份正是新疆地区气温大幅下降之际，而天山以北地区降水量大于天山以南地区，降水加之积雪覆盖致使冬季风蚀气候侵蚀力重心大幅度南移。





注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2020)4619号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1 风蚀气候侵蚀力重心分布及迁移特征

Fig. 1 Distribution and migration characteristics of gravity center of wind erosion climate erosivity

表1 风蚀气候侵蚀力年重心迁移特征

Tab. 1 Characteristics of annual gravity center migration of wind erosion climate erosivity

年份	风蚀气候侵蚀力重心坐标		移动距离/km	移动方向
	经度	纬度		
1969	88°31′14″E	42°27′28″N	-	-
1975	87°08′59″E	43°28′17″N	190.89	144°(NW)
1980	88°23′02″E	42°44′51″N	129.93	321°(SE)
1985	87°25′51″E	43°18′38″N	93.40	132°(NW)
1990	87°39′25″E	43°15′30″N	27.58	323°(SE)
1995	87°16′30″E	43°42′50″N	62.61	112°(NW)
2000	88°59′31″E	43°00′05″N	200.68	336°(SE)
2005	90°02′23″E	42°52′49″N	117.45	352°(SE)
2010	90°05′24″E	42°49′21″N	7.20	321°(SE)
2015	88°48′29″E	42°59′16″N	143.59	173°(NW)
2019	88°56′35″E	43°04′06″N	15.90	56°(NE)

注：括号内为方向，逆时针为正。下同。

表2 风蚀气候侵蚀力的月重心迁移特征

Tab. 2 Characteristics of monthly barycentric migration of wind erosion climate erosivity

月份	风蚀气候侵蚀力重心坐标		移动距离/km	移动方向
	经度	纬度		
1	89°31′02″E	42°39′10″N	35.72	295°(SE)
2	89°39′04″E	42°22′38″N	156.87	161°(NW)
3	88°19′08″E	42°50′51″N	99.75	137°(NW)
4	87°40′11″E	43°27′53″N	17.17	7°(NE)
5	87°49′22″E	43°28′09″N	6.28	274°(SE)
6	87°50′36″E	43°25′46″N	10.34	0(E)
7	87°55′11″E	43°25′06″N	10.84	94°(NW)
8	87°54′59″E	43°31′33″N	14.07	158°(NW)
9	87°47′58″E	43°33′27″N	10.23	74°(NE)
10	87°49′26″E	43°38′47″N	84.71	295°(SE)
11	88°08′15″E	42°57′05″N	74.93	330°(SE)
12	88°43′04″E	42°36′28″N	88.98	3°(NE)

注：移动距离与移动方向均指本月到下月风蚀气候侵蚀力重心位移矢量的模和方位，12月的移动距离和方向为12月到1月的位移和方位。

从图表中可以看出，从4月开始，至9月结束，风蚀气候侵蚀力的重心徘徊在准噶尔盆地南缘及吐鲁番盆地与哈密盆地交界处，说明该区域为春夏季节新疆地区强风蚀区主要分布区。

2.2 风蚀气候侵蚀力的气候驱动力分析

2.2.1 单因素对风蚀气候侵蚀力影响的空间非平稳性研究 通过解释变量回归系数的空间化表达，得出各影响因子对风蚀气候侵蚀力影响程度的空间特征(图2)。

从图2可以看出，风速、平均气温、降水量及相对湿度的回归系数既有正值也有负值，正相关与负相关区域相互交错，表明各因子对风蚀气候侵蚀力的影响程度具有空间异质性。从回归系数绝对值的大小来看，气候因子对风蚀气候侵蚀力的影响程度表现为风速>平均气温>降水量>相对湿度。从具体影响特征来看：

风速对C值的影响在97%的区域呈现出正相关效应，其回归系数在空间分布上呈现从西到东逐渐递增的趋势，整体上以85°E为界，东西两极分化的对称分布状态，高值区和低值区均出现在北疆地区，其中北疆西北部地区C值受风速的影响最小，东疆地区C值对风速的变化最为敏感。

降水量对C值的影响呈现出明显的南北差异，其主要原因在于北疆地区平均降水量高于南疆地区，所以降水量对北疆地区C值的抑制作用明显高于南疆地区，从区域上看，北疆东北部地区C值受降水的影响最大，其中北疆阿勒泰地区C值对降水的变化最为敏感，南疆塔里木盆地东南缘及北疆博州及塔城一带降水对风蚀的抑制作用甚微。

气温对C值的影响呈现沿纬度变化的层状分布状态，南北差异显著，北疆地区气温对C值的影响表现为正相关效应，且相关性随纬度的增加而增大，其中阿勒泰地区平均气温对风蚀气候侵蚀力的促进作用最为显著，而南疆地区呈负相关效应，纬度越高敏感性越低，巴州东南角区域C值对气温变化最为敏感。

2.2.2 气候变化驱动机理的阶段性差异及敏感性分析 为进一步综合分析各气象要素对风蚀气候侵蚀力的影响，根据有效敏感指数，将各气象因子的有效敏感区进行了可视化处理，分析气象因子有效敏感区的阶段性变化特征，从解释变量有效影响面积的大小来定量分析气候因子影响气候侵蚀力重要性程度。

据图3可知，1969—1979年相对湿度敏感区纵跨阿勒泰地区、乌鲁木齐以东地区及哈密地区北部，相对湿度的EIA为13784.86 km^2；降水量敏感区位于阿勒泰南部地区及昌吉州东部地区，降水量的EIA为26790.43 km^2；风速敏感区为哈密西北部地区、塔里木盆地西缘及巴州中南部地区，风速的EIA为275305.63 km^2；气温敏感区位于阿勒泰地区与塔

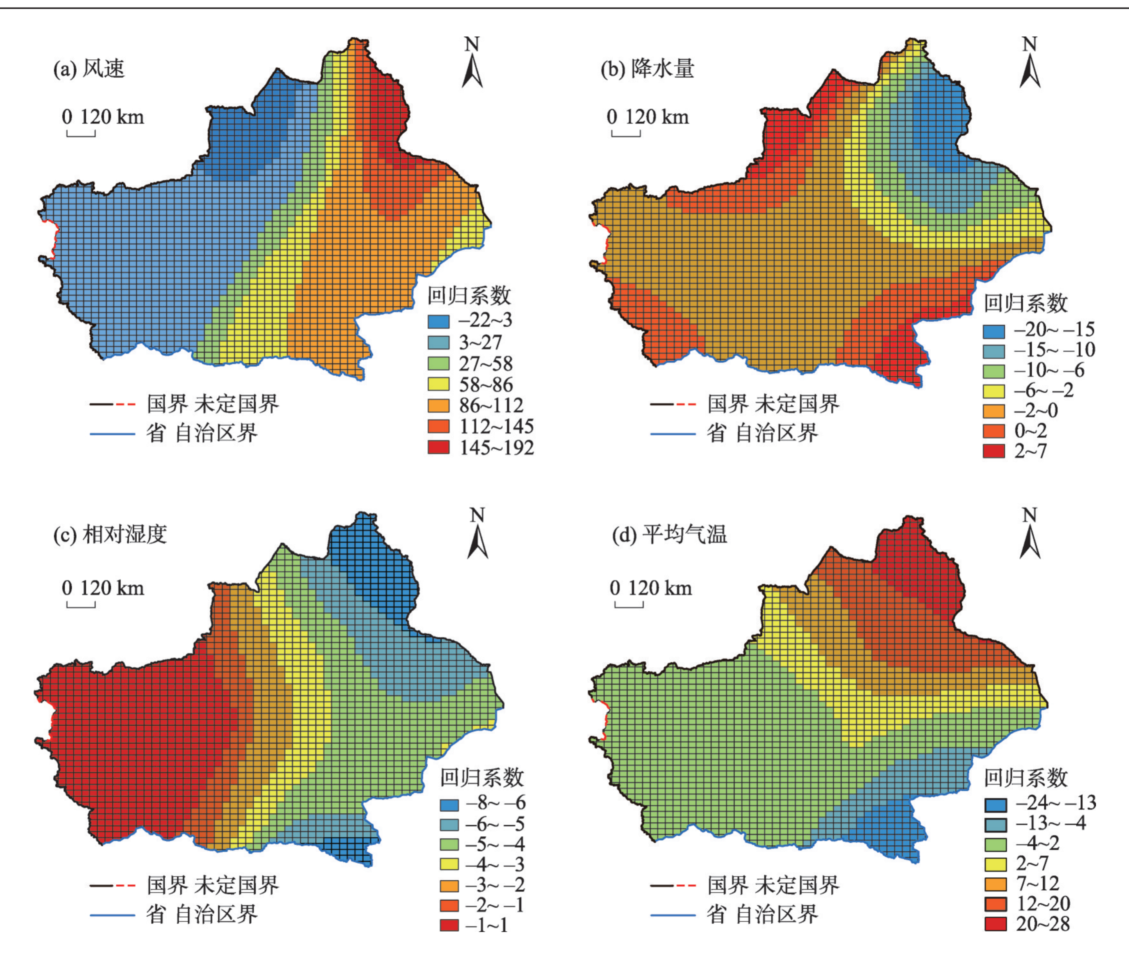


图2 解释变量回归系数空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of regression coefficients of explanatory variables

城地区北部，平均气温的EIA为40898.3 km^2。其中平均气温、相对湿度及降水量3个因素的影响区域在空间上有重叠，重叠部分区域的面积为187549.95 km^2，表明该区域风蚀气候侵蚀力受平均气温、相对湿度及降水量的共同影响。

1980—1989年4个解释变量的有效影响范围均有所扩大，其中风速的EIA扩大了65942.40 km^2，平均气温的EIA扩大了29387.97 km^2，降水量的EIA扩大了817.80 km^2，相对湿度的EIA扩大了3474.30 km^2，南疆塔克拉玛干沙漠南缘扩展为相对湿度敏感区，而风速、平均气温及降水量敏感区的重心位置较过去10 a未发生变化。平均气温、降水量及相对湿度敏感区在北疆西北部有重叠，说明该区域的风蚀气候侵蚀力受平均气温、降水量、相对湿度的共同作用，影响区面积为200366.85 km^2。昆仑山与阿尔金山交界地区，风蚀气候侵蚀力受风速与平均气温的共同作用，作用面积为154418.60 km^2。

1990—1999年风速敏感区向北移动至巴州东南缘及吐鲁番和哈密地区，风速的EIA为283768.56 km^2，气温敏感区南移至南疆塔克拉玛干东南角区域，平均气温的EIA为15596.83 km^2，相对湿度及降水量敏感区的重心位置较过去10 a未发生较大变化，但二者的EIA分别缩小了7088.80 km^2、5624.18 km^2，阿勒泰南部区域为降水量和相对湿度的共同作用区，其作用面积为56185.85 km^2，阿尔金山及昆仑山脉交接部分区域的风蚀气候侵蚀力受平均气温与风速的共同作用，重叠区面积为89422.55 km^2。

2000—2009年风速敏感区持续上移，风速的EIA缩小至161944.63 km^2，南北疆均分布有气温敏感区，平均气温的EIA为18843.66 km^2，降水量敏感区向北扩展，覆盖整个阿勒泰地区，降水量的EIA为12077.92 km^2，相对湿度敏感区重心位置未发生变化，但相对湿度的EIA缩小了7844.86 km^2。4个解释变量在阿勒泰地区及昌吉州产生空间上的重叠，重叠区域面积为81509.05 km^2，说明该部分区域风

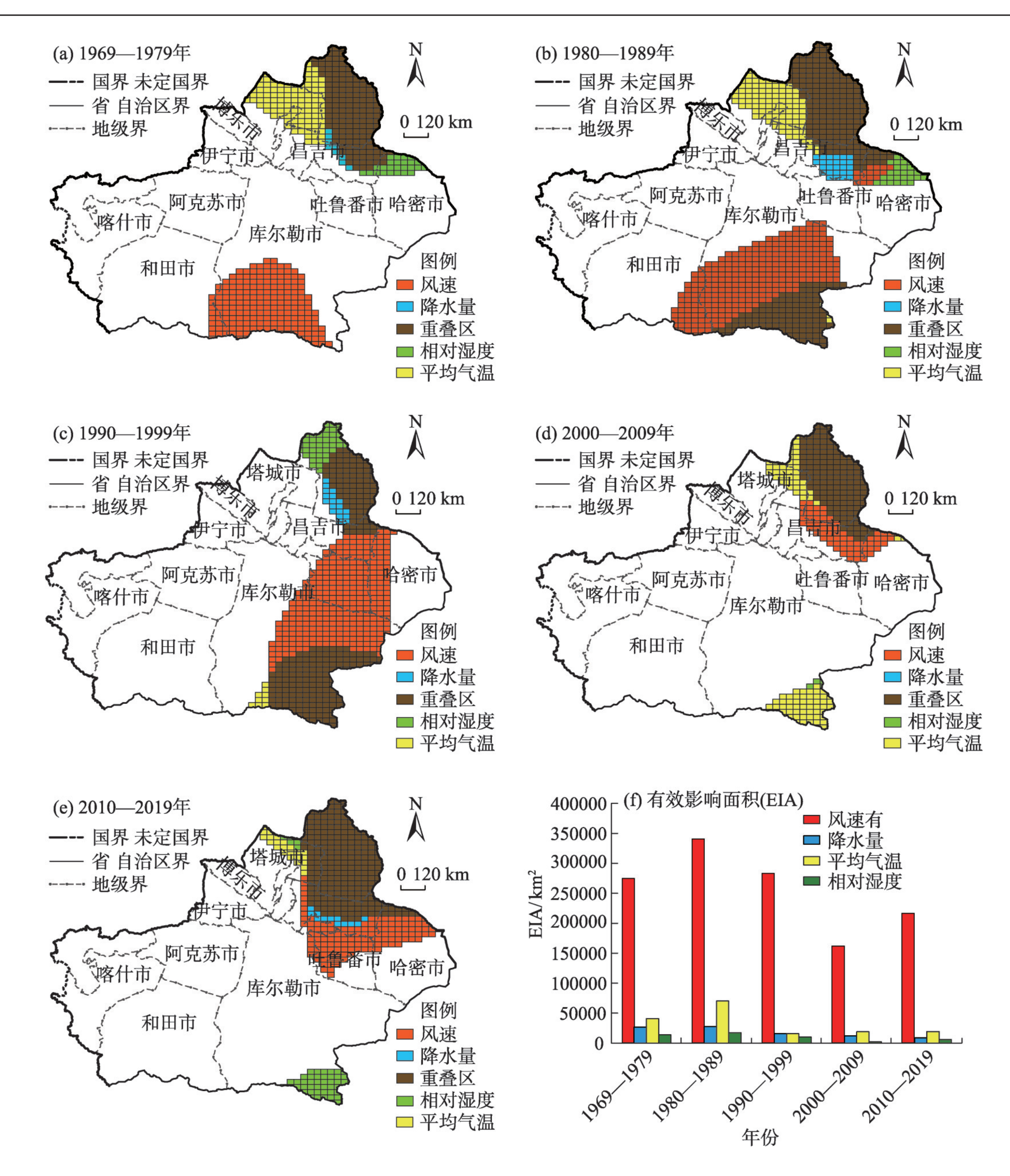


图3　解释变量有效敏感区时空变化特征及有效影响面积统计图

Fig. 3　Spatial and temporal distribution characteristics of the effective sensitive areas of explanatory variables and statistical diagram of the effective affected area

蚀气候侵蚀力受风速、降水量、相对湿度和平均气温的共同影响。

2010—2019年风速敏感区向西南方向扩展，风速的EIA增大了54705.25 km²，气温敏感区分布在北疆北部，平均气温的EIA扩大了448.67 km²，降水量的EIA缩小了3096.80 km²，仅分布在阿勒泰南部区域，南疆阿尔金山与昆仑山交接部分区发展为相对湿度敏感区，其EIA扩大了3646.44 km²，4个解释变量的共同影响区域较过去10 a未发生较大变化。

区域上，北疆阿勒泰地区风蚀气候侵蚀力主要受相对湿度、降水量及平均气温的影响，2010年以前风速和平均气温为影响南疆西南部地区风蚀气候侵蚀力的主导因素且影响面积逐年缩减。此后，相对湿度发展成为南疆东南部地区的主要影响因素，东疆地区风蚀气候侵蚀力主要受风速的影响。从EIA的大小来看，整体上，平均气温和风速为新疆地区风蚀气候侵蚀力主要影响因素。50 a间降水量及相对湿度的EIA呈降低趋势，平均气温及风速的EIA呈波动下降的趋势。其中近30 a风速的EIA减少了124598.15 km²，平均气温的EIA减少了

51891.28 km²,相对湿度的EIA减小了11287.12 km²,降水量的EIA减少了18627.12 km²。从敏感区变化特征来看,50 a间风速敏感区持续向北移动,南疆气温敏感区的范围逐年缩减,相对湿度及降水量敏感区多年未发生较大变化,主要集中在北疆北部地区。

3 讨论

目前关于风蚀气候侵蚀力时空变化特征的相关研究较多,本研究在此基础上拓展研究了风蚀气候侵蚀力重心的空间变化特征。研究结果指出,1969—2019年风蚀气候侵蚀力重心变化范围主要集中在南疆、北疆和东疆交界处,说明该区域为风蚀高危区,这与杨光华等[24]的研究结果一致。道然·加帕依等[25]的研究指出近46 a来亚洲经向环流呈减弱趋势,而纬向环流呈加强趋势,20世纪60—80年代,亚洲环流经向度偏大以经向环流为主;80年代后期,经向环流减弱,转为纬向环流,本研究则发现风蚀气候侵蚀力年代际重心在此期间同样出现了经纬向迁移的趋势,且最终倾向于向高纬度地区移动,说明风蚀气候侵蚀力年代际重心的迁移可能与大气环流的经纬向迁移有关。此外,李耀辉等[26]研究指出,近40 a之前新疆西北部阿拉山口地区为大风频发区,高婧等[27]的研究结果则表示近50 a新疆大风频发区的中心位于天山中东部地区,而本文的研究发现近50 a风蚀气候侵蚀力年际重心同样呈现东西向迁移的特征,说明风蚀气候侵蚀力的年际重心迁移还可能与大风频发区的此消彼长变化有关。

吴成永等[9,11,28]的研究指出风蚀气候侵蚀力与风速、气温呈正相关关系,与降水量及相对湿度呈负相关关系,风速为影响风蚀气候侵蚀力的主导因素,这与本研究结果一致,此外本研究在前人研究的基础上进一步量化了各气象因子对新疆风蚀气候侵蚀力的影响程度。研究结果显示,近50 a风速、平均气温、降水量及相对湿度的EIA整体上均呈减小趋势,说明风蚀气候侵蚀力整体呈降低趋势,这可能与西风环流及冬季风的减弱以及北方冷空气活动强度与频率减弱有关,何毅等[29]研究发现,20世纪70年代至21世纪初,西风环流减弱致使地表风速呈下降状态,高婧等[30]指出近49 a北半球极涡强度和面积指数减弱导致新疆的冷空气活动强度和频率有所减弱,进而致使新疆大风日数显著减少,风速及大风日数的降低会直接减弱风蚀气候侵蚀力的大小,进而导致各解释变量的EIA减少。

4 结论

(1) 近50 a新疆地区风蚀气候侵蚀力主要分布在南疆、北疆和东疆交界处,年风蚀气候侵蚀力重心呈西北—东南—西北的迁移规律;月重心迁移呈现3个阶段,1—4月重心向北迁移,4—10月重心分布集中未发生大幅度迁移,10—12月重心大幅度向东南方向移动,在春夏季节来临之际新疆风蚀气候侵蚀力重心会由南向北,由西向东迁移,寒冷季节临近时重心则迁回天山西南部地区。

(2) 风蚀气候侵蚀力的变化受到风速、平均气温、降水量及相对湿度的空间非平稳影响,其中风蚀气候侵蚀力对风速变化最为敏感,其对平均气温的敏感性呈现出显著的南北差异,降水量和相对湿度对风蚀气候侵蚀力均呈现抑制作用,且其影响范围均分布在北疆阿勒泰地区。

(3) 区域上,北疆阿勒泰地区风蚀气候侵蚀力主要受相对湿度及降水量的影响,南疆西南部地区风蚀气候侵蚀力主要受风速和平均气温的影响,东疆地区风蚀气候侵蚀力主要受风速的影响。50 a间降水量及相对湿度EIA呈降低趋势,平均气温及风速的EIA呈波动下降的趋势,在近30 a风速、平均气温、相对湿度及降水量EIA分别减少了124598.15 km²、51891.28 km²、11287.12 km²、18627.12 km²。

参考文献(References)

[1] Ashkenazy Y, Yizhaq H, Tsoar H. Sand dune mobility under climate change in the Kalahari and Australian deserts[J]. Climatic Change, 2011, 112(3/4): 901-923.

[2] Kuhn N J, Oost K V, Cammeraat E. Soil erosion, sedimentation and the carbon cycle[J]. Catena, 2012, 94: 1-2.

[3] 肖胜生, 郑海金, 杨洁, 等. 土壤侵蚀/水土保持与气候变化的耦合关系[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(6): 106-113. [Xiao Shengsheng, Zheng Haijin, Yang Jie, et al. Coupling relationships of soil erosion/soil and water conservation and climate change[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011, 9(6): 106-113.]

[4] 江凌, 肖燚, 饶恩明, 等. 内蒙古土地利用变化对生态系统防风固沙功能的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(12): 3734-3747. [Jiang Lin, Xiao Yi, Rao Enming, et al. Effects of land use and cover change (LUCC) on ecosystem sand fixing sercive in Inner Mongolia

[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(12): 3734-3747.]

[5] 张音, 古丽贤·吐尔逊拜, 苏里坦, 等. 近60 a来新疆不同海拔气候变化的时空特征分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(4): 822-829. [Zhang Yin, Tuerxunbai Gulixian, Su Litan, et al. Spatial and temporal characteristics of climate change at different altitudes in Xinjiang in the past 60 years[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(4): 822-829.]

[6] 董玉祥, 康国定. 中国干旱半干旱地区风蚀气候侵蚀力的计算与分析[J]. 水土保持学报, 1994, 8(3): 1-7. [Dong Yuxiang, Kang Guoding. Study on the wind erosion climatie erosivity in arid and semi-arid areas[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1994, 8(3): 1-7.]

[7] Zhao Chaonan, Zhang Hanbing, Wang Man, et al. Impacts of climate change on wind erosion in southern Africa between 1991 and 2015[J]. Land Degradation & Development, 2021, 32(6): 2169-2182.

[8] Yang F B, Lu C H. Assessing changes in wind erosion climatic erosivity in China's dryland region during 1961—2012[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(9): 1263-1276.

[9] 吴成永, 陈克龙, 曹广超, 等. 近30年来青海省风蚀气候侵蚀力时空差异及驱动力分析[J]. 地理研究, 2018, 37(4): 717-730. [Wu Chengyong, Chen Kelong, Cao Guangchao, et al. The spatial and temporal differences and driving forces of wind erosion climatic erosivity in Qinghai Province from 1984 to 2013[J]. Geographical Research, 2018, 37(4): 717-730.]

[10] 韩柳. 我国北方风蚀区风速时空变化特征及其对风蚀气候侵蚀力的影响[D]. 烟台: 鲁东大学, 2019. [Han Liu. Temporal and spatial variation characteristics of wind speed and its influence on wind erosion climatic erosivity in the wind erosion region of northern China[D]. Yantai: Ludong University, 2019.]

[11] 杨兴华, 何清, 李红军, 等. 塔里木盆地风蚀气候侵蚀力的计算与分析[J]. 中国沙漠, 2012, 32(4): 990-995. [Yang Xinghua, He Qing, Li Hongjun, et al. Calculation and analysis on wind erosion climatic erosivity in the Tarim Basin[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(4): 990-995.]

[12] 马茜茜, 肖建华, 姚正毅, 等. 1960—2017年阿拉善高原风蚀气候侵蚀力时空演变[J]. 地理科学, 2021, 41(6): 1096-1104. [Ma Qianqian, Xiao Jianhua, Yao Zhengyi, et al. Spatio-temporal evolution of wind erosion climatic erosivity in the Alxa Plateau during 1960—2017[J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(6): 1096-1104.]

[13] 祁栋林, 韩廷芳, 赵全宁, 等. 青海省冬春季风蚀气候侵蚀力和起沙风日数的区域变化差异特征[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2): 23-30, 36. [Qi Donglin, Han Tingfang, Zhao Quanning, et al. Characteristics of regional variation of wind erosion climatic erosivity and number of wind days in winter and spring in Qinghai Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(2): 23-30, 36.]

[14] 孙郧峰, 仇韪, 范经云. 新疆重点生态功能区生态补偿的空间选择研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(2): 565-573. [Sun Yunfeng, Qiu Wei, Fan Jingyun. Spatial selection of ecological compensation in key ecological function area of Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(2): 565-573.]

[15] 李春娥. 新疆土地荒漠化时空变化特征分析[J]. 测绘科学, 2018, 43(9): 33-39. [Li Chun'e. Spatial-temporal variation of land desertification in Xinjiang[J]. Science of Surveying and Mapping, 2018, 43(9): 33-39.]

[16] FAO. A provisional methodology for soil degradation assessment [A]. Rome, 1979: 61-63.

[17] 环境保护部. 生态保护红线划定指南(环办生态[2017]48号)[R]. 2017-5-27. [Ministry of Environmental Protection. Guidelines for the delineation of ecological protection red line (Environmental Office Ecology[2017] No. 48)[R]. 2017-5-27.]

[18] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999. [Wei Fengying. Modern climate statistical diagnosis and prediction technology[M]. Beijing: Meteorological Press, 1999.]

[19] 史娜娜, 肖能文, 王琦, 等. 锡林郭勒盟生态安全评价及生态调控途径[J]. 农业工程学报, 2019, 35(18): 228-236. [Shi Nana, Xiao Nengwen, Wang Qi, et al. Ecological security evalution and ecological regulation approach in Xilin Gol League[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(18): 228-236.]

[20] 刘清, 杨永春, 刘海洋. 中国366个城市空气污染综合程度的时空演变特征分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(3): 820-830. [Liu Qing, Yang Yongchun, Liu Haiyang. Spatiotemporal evolution characteristics of air pollution degreein 366 cities of China[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(3): 820-830.]

[21] 张彪, 李庆旭, 王爽, 等. 京津风沙源区防风固沙功能的时空变化及其区域差异[J]. 自然资源学报, 2019, 34(5): 1041-1053. [Zhang Biao, Li Qingxu, Wang Shuang, et al. Spatial-temporal changes and regional differences of the sand-fixing service in the Beijing-Tianjin sandstorm source region[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(5): 1041-1053.]

[22] Fotheringham A S, Charlton M E, Brunsdon C. Geographically weighted regression: A natural evolution of the expansion method for spatial data analysis[J]. Environment & Planning A, 2016, 30(11): 1905-1927.

[23] 李汉廷. 干旱区资源型城市植被变化及驱动因素空间异质性[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020. [Li Hanting. Spatial heterogeneity of vegetation change and driving factors in resource based cities in arid area[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.]

[24] 杨光华, 包安明, 陈曦, 等. 基于RBFN模型的新疆土壤风蚀危险度评价[J]. 中国沙漠, 2010, 30(5): 1137-1145. [Yang Guanghua, Bao Anming, Chen Xi, et al. Wind erosion hazard assessment in Xinjiang based on RBFN model[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(5): 1137-1145.]

[25] 道然·加帕依, 车罡. 新疆东部地区风速的年代际变化及其成因[J]. 干旱气象, 2008, 26(3): 14-21. [Jiapayi Daoran, Che Gang. Inter-decadal variation of wind speed in east Xinjiang[J]. Journal of Arid Meteorology, 2008, 26(3): 14-21.]

[26] 李耀辉, 张存杰, 高学杰. 西北地区大风日数的时空分布特征

[J]. 中国沙漠, 2004, 24(6): 55-63. [Li Yaohui, Zhang Cunjie, Gao Xuejie. Temporal and spatial distribution of gale weather over northwest China[J]. Journal of Desert Research, 2004, 24(6): 55-63.]

[27] 高婧, 崔彩霞, 井立军, 等. 近49年新疆大风时空分布特征及环流背景分析[C]//中国气象学会. S5全球典型干旱半干旱地区气候变化及其影响. 北京: 中国气象学会, 2012: 15. [Gao Jing, Cui Caixia, Jing Lijun, et al. Spatial and temporal distribution characteristics and circulation background analysis of gale in Xinjiang in recent 49 years[C]//Chinese Meteorological Society. Climate Change and Its Impact in S5 Typical Arid and Semi-arid Regions of the World. Beijing: Chinese Meteorological Society, 2012: 15.]

[28] Lou J P, Wang X M, Cai D W. Spatial and temporal variation of wind erosion climatic erosivity and its response to ENSO in the Otindag Desert, China[J]. Atmosphere, 2019, 10(10): 614-629.

[29] 何毅, 杨太保, 陈杰, 等. 1960—2013年南北疆风速变化特征分析[J]. 干旱区地理, 2015, 38(2): 249-259. [He Yi, Yang Taibao, Chen Jie, et al. Wind speed change in north and south Xinjiang from 1960 to 2013[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(2): 249-259.]

[30] 高婧. 新疆大风时空变化特征及环流背景研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2010. [Gao Jing. Research on the temporal and spatial distribution characteristics of strong wind and circulation featureof windy weather in Xinjiang[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010.]

Migration characteristics of wind erosion climate erosivity and its influencing factors in Xinjiang in recent 50 years

WANG Yaqin[1,2], YANG Haimei[1,2], FAN Wenbo[1,2], XU Zhongyu[3], QIAO Changlu[1,2]

(1. College of Water & Architecture Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, Xinjiang, China; 2. Key Laboratory of Modern Water-saving Irrigation of Xinjiang Production & Construction Group, Shihezi University, Shihezi 832000, Xinjiang, China; 3. College of Science, Shihezi University, Shihezi 832000, Xinjiang, China)

Abstract: Based on daily meteorological data of 62 meteorological stations in Xinjiang, China from 1969 to 2019, this study investigated the influence of meteorological factors on wind erosion climatic erosivity. Geographically weighted regression and gravity center migration models were used to analyze the gravity center migration law of wind erosion climatic erosivity in Xinjiang from the spatial and temporal scales. Combined with the effective sensitivity index and effective affected area, the sensitivity degree of wind erosion climatic erosivity to various meteorological factors was quantitatively described. The dominant factors of wind erosion climatic erosivity in different regions of Xinjiang were analyzed. The results showed that the center of gravity of wind erosion for the past 50 years is mainly located at the junction of the north-south and east boundaries. The migration directions of inter-annual and inter-month show a northwest-southeast-northwest cycle. The center of gravity of wind erosion moves from the northwest to the southeast at the onset of the spring and summer and then moves back to the northwest when the cold season approaches. The degree of influence of climatic factors on wind erosion climatic erosivity is shown as wind speed>air temperature>precipitation>relative humidity. In the past 30 years, the effective influence of wind speed, mean air temperature, humidity, and precipitation on wind erosion has decreased by 124598.15 km^2, 51891.28 km^2, 11287.12 km^2, and 18627.12 km^2, respectively. Regionally, the wind erosion climatic erosivity is mainly influenced by relative humidity and precipitation in the Altai Prefecture of north Xinjiang. Wind speed and temperature are the main factors influencing wind erosion climatic erosivity in the southwest of southern Xinjiang. Wind erosion climatic erosivity in eastern Xinjiang is affected only by wind speed. The research results can provide regionally differentiated theoretical guidance for preventing and assessing soil wind erosion disasters in Xinjiang. It can also provide new research perspectives for studying large-scale driving forces of soil wind erosion.

Key words: wind erosion climate erosivity; climate change; center of gravity migration; geographically weighted regression; Xinjiang